第40卷 第12期
2023年12月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 12
Dec. 2023

新疆气候干湿变化特征及其影响因素

董翰林[1]， 王文婷[2]， 谢 云[1,2]， 阿依达娜·叶斯那力[1]， 江源天[2]， 徐嘉淇[1]

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室，北京 100875；
2. 北京师范大学文理学院（珠海校区），广东 珠海 519087)

摘 要： 基于新疆56个气象站1961—2019年逐日地面观测数据，分析了过去59 a间新疆干湿变化特征及其成因，主要结论如下：(1) 新疆正经历显著的由干向湿的转变。在1961—2019年期间，区域平均干燥度指数（Aridity Index，AI）以 $0.01\cdot(10a)^{-1}$ 的速率上升（$P < 0.01$），并于1987年前后发生突变。全区呈显著上升趋势的站点占比为57.1%。(2) 1961—2019年间新疆年降水量以 $8.6\ mm\cdot(10a)^{-1}$ 的速率显著增加，突变时间与AI突变时间一致。年参考作物蒸散量（reference evapotranspiration，ET_0）在1961—2019年可检测到显著的下降趋势，变化速率为 $-15.7\ mm\cdot(10a)^{-1}$。但值得注意的是，年 ET_0 在1990年前后发生转变，1990年以前持续下降，1990年后转为波动上升。(3) ET_0 的变化主要受风速与相对湿度两种气候因子的控制。在1961—2019年间，全区风速基本呈下降趋势，有接近一半站点的相对湿度也呈下降趋势，二者的共同作用导致新疆50%站点的 ET_0 显著下降。而 ET_0 在1990年前后的转变也是由于相对湿度和风速变化趋势在1990年前后的转变引起的。1990年左右，相对湿度由上升趋势转为下降趋势，风速则由下降趋势转为上升趋势。共同导致了 ET_0 在两个时期变化趋势的差别。该结论加深了对新疆干湿变化及其成因的认识，并对新疆水资源的合理开发利用具有一定参考价值。

关键词： 气候干湿变化；干燥度指数；蒸散量；影响因素；新疆

全球正经历显著的地表增温，且在20世纪中叶以来进一步加剧[1-2]。气候变化和水循环互相影响[3]，改变了区域降水量和蒸散量的时空分配[4]。根据区域水量平衡原理，降水与蒸发的变化将影响区域水分收支，进而影响区域水资源分配格局。新疆地处亚欧大陆内部，降水变率大但总量少，蒸散量大，气候干燥。一直以来，水资源短缺、时空分布不均是制约新疆经济发展的瓶颈[5]。新疆生态环境脆弱，是我国对全球气候变化响应最敏感的区域之一[6-7]。探究气候变化背景下新疆气候干湿状况的变化，既有利于保障区域生态环境安全，也是地区经济可持续发展的重要支撑。

21世纪初，施雅风院士提出西北干旱区“暖湿化”的科学推论，改变了此前对于西北地区“暖干化”的认知[8]。此后，众多学者采用不同的干旱指数，针对西北地区“暖湿化”的观测事实、变化趋势、成因及未来预估展开了一系列研究[6,9-16]。新疆被认为是西北干旱区“暖湿化”最显著的地区，但新疆干旱区北部、东部的变化趋势也存在差异[9]。张强等[6]的研究表明，1961年以来西北西部呈变湿趋势，温度、降水、干燥度指数变化的一致性较好，但这种暖湿化尚未改变该地区原有的气候形态；张红丽等[14]也指出，西北西部正经历稳定的增温、增湿过程，且其增湿较西北东部更早、更显著；普宗朝等[12]利用新疆1961—2008年逐月气候资料对干湿时空变化特征进行研究，结果表明近48 a来新疆年干燥度指数均呈现不同程度的减小趋势；李红军[13]利用改进后的PDSI干湿指数（Palmer Drought Severity Index，PDSI）对1961—2007年塔里木河流域干湿时空变化情况进行了分析，结果表明全流域有显著的变湿趋势，夏季变湿趋势最强，流域东部区域变湿速度最快。也有学者指出，新疆自20世纪80年代中期以来呈“暖湿化”特征，但是在1997年之后出现了由“暖湿化”向“暖干化”的转折[15-16]。

收稿日期： 2023-05-05； **修订日期：** 2023-09-11
基金项目： 国家重点研发计划项目（2021YFE0113800）
作者简介： 董翰林（1995-），男，硕士研究生，主要从事土壤侵蚀研究. E-mail: 202021051013@mail.bnu.edu.cn
通讯作者： 王文婷. E-mail: wangwenting@bnu.edu.cn

以往研究多从气温、降水方面，探讨新疆或西北地区“干湿”变化的成因。而作为影响区域水分收支的重要支出项-蒸散量，其变化也影响着区域的干湿状况。参考作物蒸散量（Reference Evapotranspiration，ET_0）表征一年中特定地点和时间的大气蒸发能力，不考虑作物特征和土壤因素的影响，是评价作物需水量、气候干湿程度、水资源供需平衡与农业生产潜力的重要指标[17-18]。由于真实的蒸散量资料往往十分难以获取，而ET_0的计算则相对容易，许多研究通过ET_0的变化分析区域的干湿状况或干湿变化[9]，但对新疆不同气候要素如何影响ET_0变化的研究较少。近年来气候变化愈发显著，1980年以来每个10 a间的平均气温依次增加，均为1850年有观测记录以来最暖的10 a[2]，延长数据序列可能会得到更显著的变化信号[9,19]。本文基于新疆56个地面气象台站1961—2019年的长序列气象观测资料，利用联合国粮食及农业组织（Food and Agriculture Organization of the United Nations，简称FAO）推荐的Penman-Monteith模型计算参考作物蒸散量ET_0，采用干燥度指数量化新疆干湿特征，并采用Mann-Kendall检验（简称M-K检验）、敏感系数与贡献率分析等统计方法，定量分析新疆在近60 a的干湿变化规律，厘清不同气候要素的变化对新疆参考作物蒸散量变化的贡献。

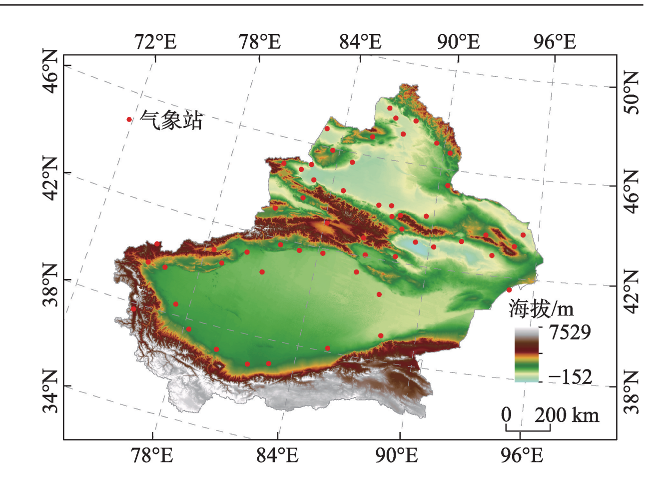
1 数据与方法

1.1 研究区概况

新疆地处亚欧大陆腹地，地形上自南向北依次分布着昆仑山脉、天山山脉、阿尔泰山脉，中间分别为塔里木盆地与准噶尔盆地。深居内陆、远离海洋的地理位置决定了水汽难以深入区域内部，形成了新疆干旱的地理环境，气候类型以温带大陆性干旱气候为主[6,14]。该地区年均日气温为7.6 ℃，年均降水量141.5 mm，相对湿度平均52%。新疆水资源总量少，仅为全国的3%，且其中大部分以冰川的形式存在[20]。

1.2 数据收集

本研究从中国气象局国家气象信息中心收集到新疆1961—2019年逐日平均气温、日降水、相对湿度、10 m风速、日照时数、日气压等气象观测数据，数据集已经过国家气象中心的初步数据质量控制[21]，其中，气温与降水数据在大量研究中被广泛



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2019)1822号，对底图边界无修改。下同。

图1 研究区56个气象站点的空间分布

Fig. 1 The spatial distribution of 56 meteorological stations used in this study

使用[6,21-22]。获取数据后，根据《地面气象观测规范》对数据进行了二次质量控制，以剔除数据缺测较多的站[23]，选出满足6种气象要素1961—2019年具有连续观测的站点56个，站点空间分布见图1。

1.3 数据分析

在已有的用于评价区域干旱程度、干湿状况的指数中，干燥度指数（Aridity Index，AI）在考虑温度对蒸散影响的基础上来表征气候干湿程度[6,24-25]，更适用于表征气候态干旱变化的长期趋势[9]，被广泛应用于气候变化背景下的干湿状况研究，计算方法如下：

$$AI = \frac{P}{ET_0}$$

式中：ET_0为年参考作物蒸散量，本研究采用FAO（1998）推荐的Penman-Monteith公式计算参考作物蒸散量ET_0[26]（mm）；P为年降水量（mm）；AI＞1表明区域水分收入大于支出，越大则区域越湿润；AI＜1表明区域水分收入小于支出，越接近0则表明区域越干旱。

采用Mann-Kendall趋势检验对AI、年降水量、年ET_0，以及其他4种可能影响ET_0的气候要素的数据序列进行时间趋势显著性检验[27-28]，本研究选择的显著水平为$P = 0.05$。采用Theil and Sen's approach方法量化气象数据的变化趋势[29-30]，并定义10 a变化趋势为气候倾向率。

气候要素变化对参考作物蒸散量（ET_0）变化的贡献率为气候要素多年相对变化率与敏感性系数

的乘积[29]。敏感系数指标最早由McCuen[31]于1974年提出，后被广泛应用于蒸散发研究中，正/负敏感系数分别表明ET_0会随着该气候要素的增加而增加/减少[32]。贡献率>0表示气候要素变化导致ET_0增加，为正贡献；贡献率<0表示气候要素变化导致ET_0减少，为负贡献[33]。

2 结果与分析

2.1 干湿特征变化及成因分析

基于1961—2019年新疆的观测资料可得，新疆区域站点的干燥度指数(AI)在0.01~0.91之间。在56个气象站中，有8站可划分为极端干旱区(AI<0.03)，30站可划分为干旱区(0.03≤AI<0.2)，13站为半干旱区(0.2≤AI<0.5)，5站为半湿润区(0.5≤AI<1)。通过空间插值(图2a)，统计出新疆属于以上4种分区的面积比例分别为2.6%、75.4%、20.5%和1.84%。

在过去59 a间，新疆呈现显著的变湿趋势。呈显著上升的站点占比超过50%，空间上主要分布于新疆西北部(图2b)。区域内56个站点的逐年AI均值呈波动上升的变化规律(图3a)，气候倾向率为0.01·(10a)$^{-1}$(P<0.01)。AI在1987年前后发生突变(图3b)，该结果与施雅风等[8]研究指出的新疆气候于1987年开始发生突变的结论一致。

AI反映区域水分收支状况，AI的变化意味着相同区域干湿类型的转变。通过对比研究时段中最早10 a(1961—1970年)与最晚10 a(2010—2019)两个时段的AI发现，96%的站点在2010—2019年时段AI数值更大。相比1961—1970年，2010—2019年间可划分为极端干旱区的站点数减少6个，干旱区站点减少2个，与此同时，半干旱区站点增加8个。即新疆共有8个站点的干湿分区已发生了改变。

由图2c、图3c可知，在1961—2019年间，新疆的年降水量显著增多，呈显著上升趋势的站点占比接近70%(表1)，主要分布于天山山脉南北两侧以

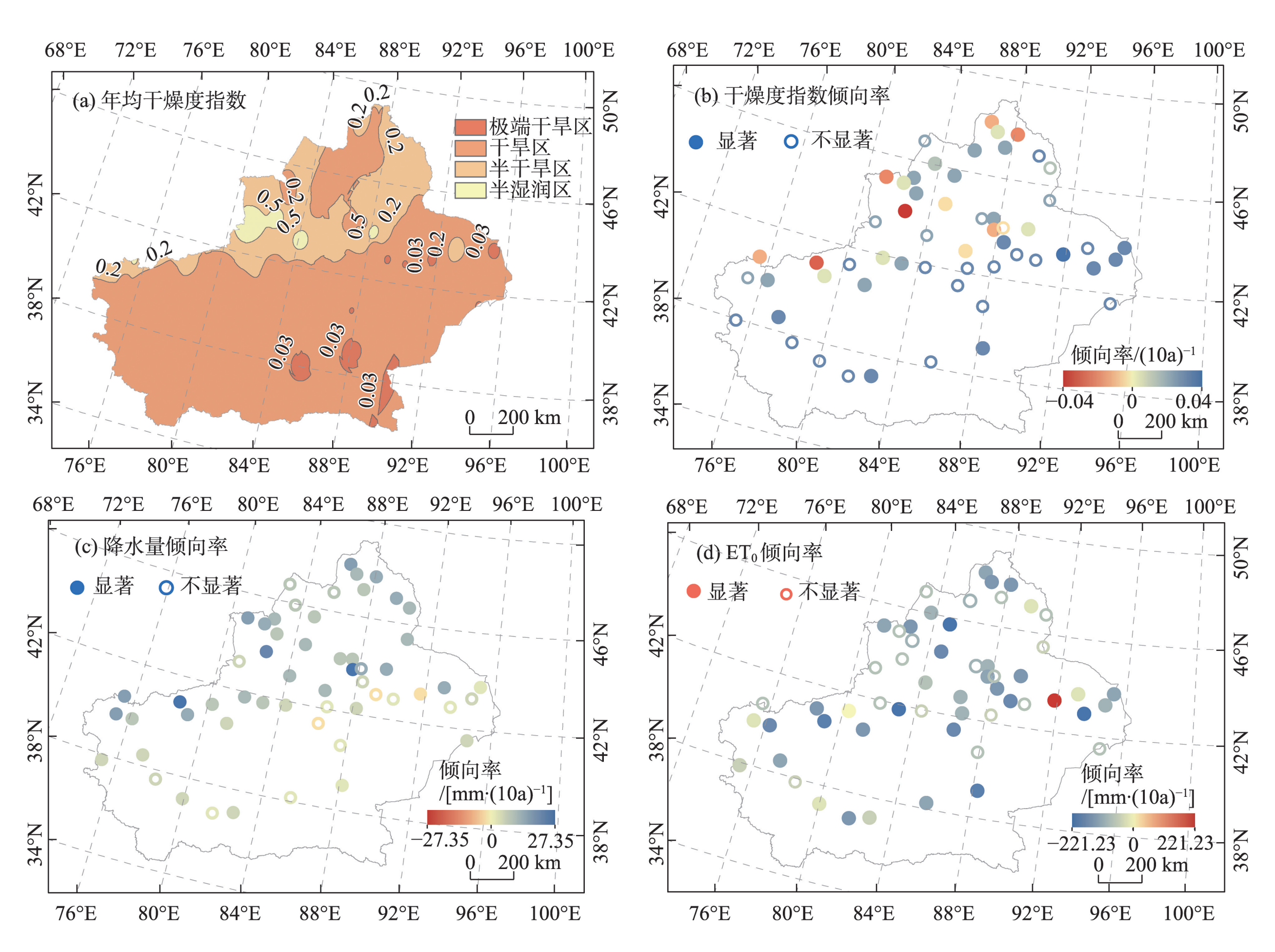


图2 新疆56个气象站点过去59 a间年均干燥度指数空间分布以及3个指标的气候倾向率

Fig. 2 The spatial distribution of annual average aridity index and inclination rate of three index over the past 59 years for the 56 meteorological stations in Xinjiang

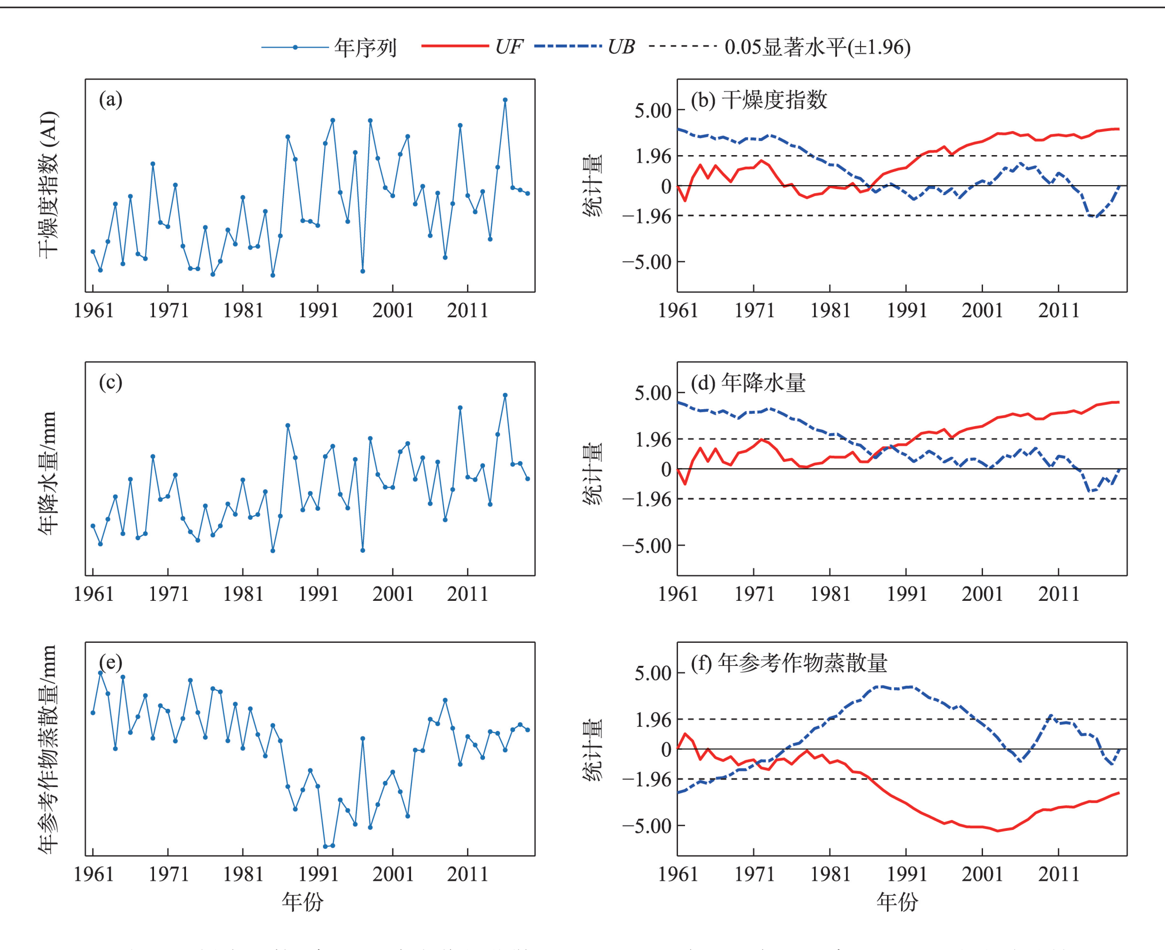


图3 新疆干燥度指数、降雨量、参考作物蒸散量1961—2019年间逐年时间序列及M-K突变检验结果

Fig. 3 The time series of aridity index, precipitation, and reference evapotranspiration year by year during 1961−2019 and its results of M-K mutation test in Xinjiang

及阿尔泰山脉南部。区域站点年降水量均值的气候倾向率为8.6·(10a)$^{-1}$(P<0.01),与普宗朝等[12]关于新疆近48 a降水量变化趋势的结果基本一致。AI的变化受到水分收入项(降水量)与支出项(蒸散量)的共同影响,但降水的影响可能大于蒸散。陈发虎等[9]的研究表明,西北地区降水的变化对该地区干湿变化起主导作用,占总贡献量的75%。

新疆年降水量在不同时期呈现不同的变化特征(图3c),1961—1970年间呈快速上升状态,1971年至20世纪80年代中期上升速率放缓,之后又进入波动上升的状态。年降水量在1990年前后发生突变(图3d),即在1992年后新疆的年降水量显著增多。据张强等[6]的分析推测,该区域降水的阶段性变化与西风环流的动向有着紧密的联系。西风环流在60年代显著增强,于70—80年代中期显著减弱,80年代后期开始持续增强,与本研究区内降水的时间变化规律相吻合[6]。

1961—2019年间,新疆大部分站点的年参考作物蒸散量ET_0呈下降趋势,其中,呈显著下降趋势的站点占比50%。56个站点逐年ET_0均值的倾向率为−15.7 mm·(10a)$^{-1}$(P<0.01),于1971年前后检测到突变(图3f),早于AI与降水量的突变拐点。除了总体趋势,另外,值得注意的是ET_0变化趋势在1990年前后的变化(图3e):ET_0在1961—1990年间波动下降,但在1990年之后转为波动上升,这与AI、年降水量序列在1961—2019年持续上升的变化规律不同。

综合降水与ET_0的变化可知,在20世纪90年代之前,新疆年降水量持续上升、年ET_0持续下降,而90年代之后,新疆年降水量继续上升,但年ET_0由下降转为上升趋势。据此,笔者在后续的分析中将研究时段1961—2019年划分为两部分:偏湿阶段(1961—1990年)、偏干阶段(1991—2019年),分别探讨在不同时期4种气候要素对ET_0变化的贡献率,并与整个时段进行比较。

2.2 参考作物蒸散量的气候变化原因分析

贡献率代表某种气候要素变化对ET_0变化的贡

献。图4a中展示了基于1961—2019年新疆气象资料计算的4种气候要素贡献率的对比。由图可以看出,不同气候要素间量级的差异较大。气温与日照时数的贡献率整体较小,意味着这2种气候要素的变化对ET_0变化趋势的影响较小;相对湿度与风速贡献率较大,表明这2种气候要素对新疆ET_0的下降起到更关键的作用。

相对湿度的贡献率在-25.1%~20.5%之间,绝对值的均值为7.5%,正贡献与负贡献的站点占比相当,在空间上没有明显的分布规律。相对湿度的敏感系数变化范围在-2.5~-0.5之间,所有站点均为负值(图4b),表明ET_0的增加与相对湿度的增加为负相关,然而相对湿度对ET_0变化的贡献率却有正有负,这是由于贡献率同时受气候要素敏感系数与自身变化趋势的共同影响。在过去60 a间,新疆相对湿度的变化趋势有增有减(图5b),上升与下降站点的占比相当(表1),全区域56个站点相对湿度年均值的气候倾向率在数值上为0。

风速的贡献率在-51.0%~28.1%之间,多数站点的贡献率为负值,这部分站点的占比为86%(图4a)。所有站点风速的敏感系数均为正值(图4b),均值为0.47,表明ET_0的变化与风速变化为正相关,即ET_0随着风速的增加而增加。由图5d可知,新疆的风速在1961—2019年间以下降趋势为主,呈显著下降的站点占比75%,区域整体倾向率为-0.1 $m\cdot s^{-1}\cdot(10a)^{-1}$(表1)。因此,新疆风速下降对新疆大部分站点的$ET_0$变化起到了负贡献。

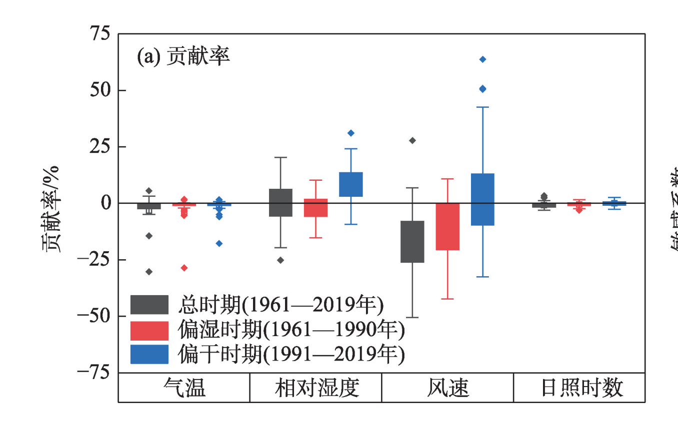
结合图2d、图5分析ET_0的时空变化趋势可知,当相对湿度、风速均为负贡献时,ET_0多呈现显著下降趋势;当风速为负贡献,相对湿度为正贡献,且二者呈量级相近时,ET_0的变化趋势不显著;当风速为负贡献且数值较小或为正值,而相对湿度呈较大正贡献时,ET_0多呈显著上升趋势。由于风速在全区域呈现一致的下降趋势,几乎全部站为负贡献,而相对湿度也有将近一半站点在区域上呈下降趋势,2种气候要素共同作用导致新疆50%的站点ET_0在

表1　基于M-K检验的新疆56个站点1961—2019年间不同变量的变化趋势(P=0.05)

Tab. 1　Variation trend of different variables of 56 stations in Xinjiang during 1961-2019 based on Mann-Kendall test (P=0.05)

变量	上升趋势		下降趋势		倾向率/$(10a)^{-1}$
	比例/%	显著/%	比例/%	显著/%	
干燥度指数AI (0~1)	98.2	57.1	1.8	1.8	0.01**
年降水量/mm	94.6	69.6	3.6	1.8	8.6**
年潜在蒸散量/mm	32.1	16.1	67.9	50.0	-15.7**
气温/℃	98.2	96.4	1.8	1.8	0.3**
相对湿度/%	53.6	26.8	46.4	30.4	0.0
风速/$(m\cdot s^{-1})$	14.3	7.1	85.7	75.0	-0.1**
日照时数/h	25.0	8.9	75.0	53.6	-0.1**

注:**表示趋势在P=0.01显著水平;*表示趋势在P=0.05显著水平。



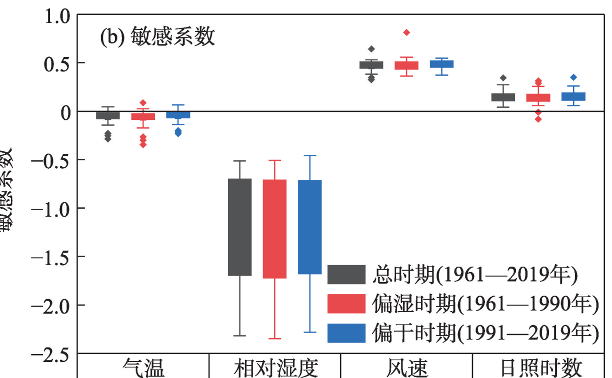


图4　主要气候要素贡献率(a)及敏感系数(b)箱型图

Fig. 4　Box plots for contribution rate (a) and sensitivity coefficient (b) for four climate factors

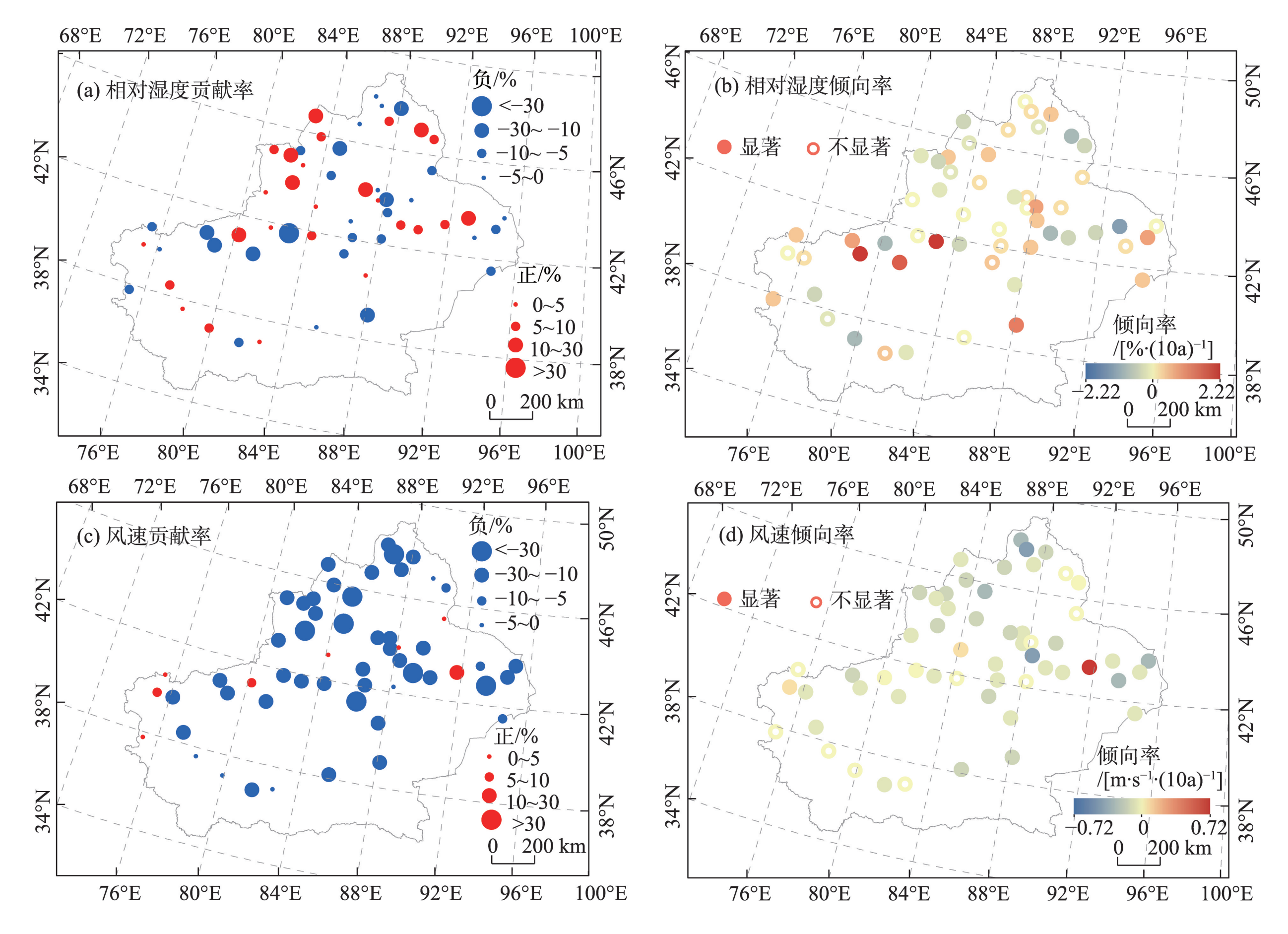


图5 相对湿度与风速对参考作物蒸散量变化的贡献率及自身气候倾向率的空间分布

Fig. 5 The spatial distribution of the contribution rate of relative humidity and wind speed for the variation of ET_0 and the climate inclination rate of relative humidity and wind speed

1961—2019年间呈显著下降趋势。

另一点值得注意的是,在过去近60 a间,新疆气温持续升高(图6a),通常认为气温升高、蒸发能力增强,但是新疆的ET_0在增温背景下呈下降趋势,前人研究中也得出类似的结论[31,34]。根据Penman-Monteith公式可知,ET_0受多种气候要素的共同控制。在区域增暖过程中,其他气候要素也同步发生变化(图6),共同影响着ET_0的变化趋势。由图4可以看到,新疆ET_0变化的主控因子是风速与相对湿度,相比气温,ET_0对风速与相对湿度的变化更敏感。

2.3 偏湿阶段与偏干阶段对比

从研究时段整体来看,由于1961—2019年间新疆年均降水量显著上升、年均ET_0显著下降,导致新疆AI在过去59 a间呈显著增加趋势,结合同期气温的显著上升变化趋势可知(图6a,表1),新疆的气候在1961—2019年间呈“暖湿化”的变化趋势。但同时也必须注意降水与ET_0在1990年前后变化趋势的差异及其导致的干湿变化特征的差异:研究时段前期(1961—1990年)偏湿,后期(1991—2019年)偏干。换言之,虽然,新疆的气候在1961—2019年全时段呈现出统计上显著的“暖湿化”趋势,但其在1991—2019年间正在由“暖湿化”向“暖干化”转变,这与姚俊强等[15]得到的结论相近。

偏湿与偏干2个时段的差异,主要是由于ET_0变化趋势的转变导致(图3e)。为此,笔者进一步研究了2个时段气候要素敏感系数与贡献率的差异。由图4a可知,2个时期气温与日照时数的贡献率略有差别,整体数值较小,以负贡献为主。通过对比2个时期的敏感系数与气候要素变化趋势发现(图4b,图6),二者呈负贡献的原因不同。气温的敏感系数多为负值,在偏湿与偏干时期均为上升趋势,后期升温速率更快,负敏感系数与正向变化趋势使得气温对ET_0变化的负贡献;而日照时数的敏感系数多为正值,但在偏湿与偏干时期均为下降趋势,导致了其对ET_0变化的负贡献。

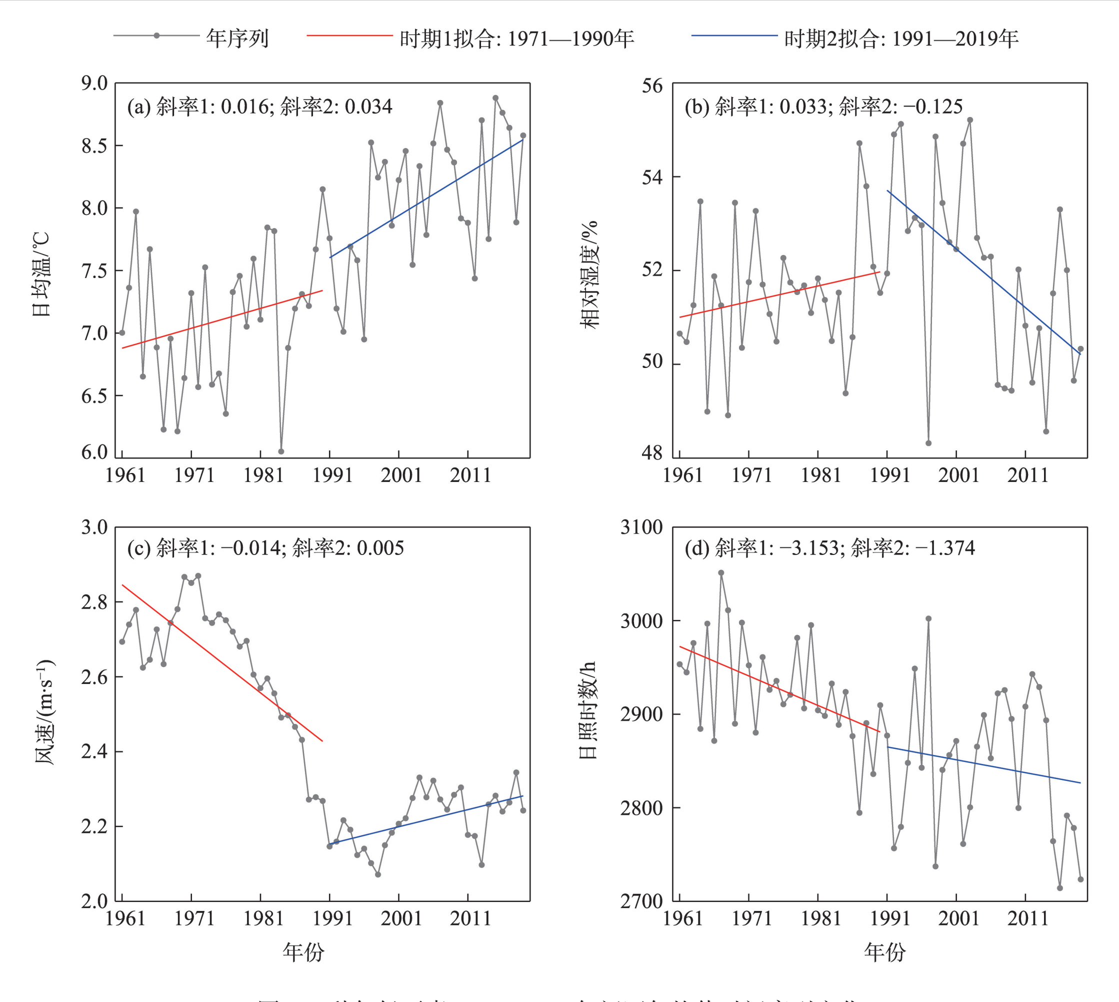


图6 4种气候要素1961—2019年间逐年均值时间序列变化

Fig. 6 Temporal variation of annual mean time series of four climate variables during1961-2019

值得注意的是,相对湿度与风速的贡献率在2个时段的差异。在偏湿时期,相对湿度与风速对ET_0均以负贡献为主,贡献率为负的站点占比分别为68%和75%;偏干时期则转为以正贡献为主,贡献率为正的站点占比分别增加到78%和59%,发生了明显的转变。从图4b可以看到,2个时期内相对湿度与风速的敏感系数十分稳定,中值与值域范围均接近,但2个时期气候要素的变化趋势不同。由图6可知,相对湿度在偏湿时期为上升趋势,1990年之后转为十分明显的下降趋势;同样地,风速在偏湿时期呈下降趋势,20世纪90年代后转为上升趋势。相对湿度与风速的敏感系数高,与ET_0变化的相关性更强,两者变化方向的转变导致了2个时期2个气候要素贡献率的差别。

3 结 论

本研究基于1961—2019年新疆56个气象站逐日地面观测数据分析了气候变化背景下新疆过去59 a间的干湿特征、变化及成因,主要结论如下:

(1) 1961—2019年间,新疆经历了显著的由干向湿的转变,干燥度指数(AI)的气候倾向率为0.01·$(10a)^{-1}$(P<0.01)。全区域98.2%的站点的AI呈上升趋势,其中,显著上升的站点占总站点的57.1%。

(2) 干燥度指数的变化是区域水分收入项(降水)与支出项(蒸散量)共同变化和作用的结果。1961—2019年间,新疆年降水量与年参考作物蒸散量均呈现显著的变化趋势,但变化方向相反。在区域尺度上,年降水量以8.6 mm·$(10a)^{-1}$的速率增加,ET_0以−15.7 mm·$(10a)^{-1}$的速率减少。在所有站点中,有接近70%的站点年降水量呈显著上升趋势,50%的站点年ET_0呈显著下降趋势。虽然,ET_0在1961—2019年总体呈下降趋势,但从时间序列来看,区域平均年ET_0的变化趋势在1990年前后发生由下降到上升的转折。

（3）相对湿度与风速对ET_0下降的贡献最大。由于风速在全区域呈现一致的下降趋势，几乎全部站为负贡献，而相对湿度也有将近一半站点在区域上呈下降趋势，2种气候要素共同作用导致新疆有接近一半站点的ET_0在过去59 a间呈显著下降趋势。ET_0在20世纪90年代左右由下降趋势转为上升趋势主要是由于2个时段相对湿度与风速趋势的转变导致。相对湿度的变化趋势在90年代左右由上升转为下降趋势，而风速的变化趋势在90年代由下降转为上升趋势。

参考文献（References）：

[1] 秦大河. 气候变化科学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2018. [Qin Dahe. Introduction to Climate Change Science[M]. Beijing: Science Press, 2018.]

[2] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

[3] Wentz F J, Ricciardulli L, Hilburn K, et al. How much more rain will global warming bring?[J]. Science, 2007, 317(5835): 233–235.

[4] 王菱, 谢贤群, 李运生, 等. 中国北方地区40年来湿润指数和气候干湿带界线的变化[J]. 地理研究, 2004, 23(1): 45–54. [Wang Ling, Xie Xianqun, Li Yunsheng, et al. Changes of humid index and borderline of wet and dry climate zone in northern China over the past 40 years[J]. Geographical Research, 2004, 23(1): 45–54.]

[5] Fan Mengtian, Xu Jianhua, Chen Yaning, et al. How to sustainably use water resources-A case study for decision support on the water utilization of Xinjiang, China[J]. Water, 2020, 12, 3564.

[6] 张强, 朱飙, 杨金虎, 等. 西北地区气候湿化趋势的新特征[J]. 科学通报, 2021, 66(28–29): 3757–3771. [Zhang Qiang, Zhu Biao, Yang Jinhu, et al. New characteristics about the climate humidification trend in Northwest China[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(28–29): 3757–3771.]

[7] 陈亚宁, 李玉朋, 李稚, 等. 全球气候变化对干旱区影响分析[J]. 地球科学进展, 2022, 37(2): 111–119. [Chen Yaning, Li Yupeng, Li Zhi, et al. Analysis of the impact of global climate change on dryland areas[J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(2): 111–119.]

[8] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152–164. [Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm wet in in Northwest China[J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(2): 152–164.]

[9] 陈发虎, 谢亭亭, 杨钰杰, 等. 我国西北干旱区"暖湿化"问题及其未来趋势讨论[J]. 中国科学:地球科学, 2023, 53(6): 1246–1262. [Chen Fahu, Xie Tingting, Yang Yujie, et al. Discussion of the "warming and wetting" trend and its future variation in the drylands of Northwest China under global warming[J]. Science China Earth Sciences, 2023, 53(6): 1246–1262.]

[10] 姜大膀, 苏明峰, 魏荣庆, 等. 新疆气候的干湿变化及其趋势预估[J]. 大气科学, 2009, 33(1): 90–98. [Jiang Dabang, Su Mingfeng, Wei Rongqing, et al. Variation and projection of drought and wet conditions in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 33(1): 90–98.]

[11] 丁一汇, 柳艳菊, 徐影, 等. 全球气候变化的区域响应: 中国西北地区气候"暖湿化"趋势、成因及预估研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2023, 38(6): 551–562. [Ding Yihui, Liu Yanju, Xu Ying, et al. Regional responses to global climate change: Progress and prospect for trend, causes and projection of climatic warming-wetting in Northwest China[J]. Advances in Earth Science, 2023, 38(6): 551–562.]

[12] 普宗朝, 张山清, 王胜兰, 等. 近48 a新疆干湿气候时空变化特征[J]. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1563–1572. [Pu Zongchao, Zhang Shanqing, Wang Shenglan, et al. The spatial-temporal variation characteristic of dry-wet climate in recent 48 years in Xinjiang Province, China[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(6): 1563–1572.]

[13] 李红军. 近50年塔里木河流域干湿变化特征及其成因分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012. [Li Hongjun. The Analysis of Variation Characteristics and Cause of Drought-Wetness over Tarim River Basin in Recent 50 a[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2012.]

[14] 张红丽, 韩富强, 张良, 等. 西北地区气候暖湿化空间与季节差异分析[J]. 干旱区研究, 2023, 40(4): 517–531. [Zhang Hongli, Han Fuqiang, Zhang Liang, et al. Analysis of spatial and seasonal variations in climate warming and humidification in Northwest China[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(4): 517–531.]

[15] 姚俊强, 毛炜峄, 陈静, 等. 新疆气候"湿干转折"的信号和影响探讨[J]. 地理学报, 2021, 76(1): 57–72. [Yao Junqiang, Mao Weiyi, Chen Jing, et al. Signal and impact of wet-to-dry shift over Xinjiang, China[J]. Acta Geographica Sinca, 2021, 76(1): 57–72.]

[16] Yao Junqiang, Zhao Yong, Chen Yaning, et al. Multi-scale assessments of droughts: A case study in Xinjiang, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 630(1): 444–452.

[17] 高歌, 陈德亮, 任国玉, 等. 1956—2000年中国潜在蒸散量变化趋势[J]. 地理研究, 2006, 25(3): 378–387. [Gao Ge, Chen Deliang, Ren Guoyu, et al. Trend of potential evapotranspiration over China during 1956 to 2000[J]. Geographical Research, 2006, 25(3): 378–387.]

[18] 倪广恒, 李新红, 丛振涛, 等. 中国参考作物腾发量时空变化特性分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 1–4. [Ni Guangheng, Li Xinhong, Cong Zhentao, et al. Temporal and spatial characteristics of reference evapotranspiration in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(5): 1–4.]

[19] Sun Qiaohong, Zhang Xuebin, Zwiers F, et al. A global, continental, and regional analysis of changes in extreme precipitation[J].

Journal of Climate, 2021, 34(1): 243−258.

[20] 左其亭, 李佳伟, 马军霞, 等. 新疆水资源时空变化特征及适应性利用战略研究[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 21−27. [Zuo Qiting, Li Jiawei, Ma Junxia, et al. Study on spatio-temporal variation characteristics and adaptive utilization strategy of water resources in Xinjiang[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 21−27.]

[21] Li Jian, Yu Rucong, Yuan Weihua, et al. Changes in duration-related characteristics of late summer precipitation over eastern China in the past 40 years[J]. Journal of Climate, 2011, 24(21): 5683−5690.

[22] Wang Wenting, Yin Shuiqing, Yu Juan, et al. Long-term trends of precipitation and erosivity over Northeast China during 1961−2020 [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2023, 11 (4): 743−754.

[23] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2013. [China Meteorological Administration. Specifications for Surface Meteorological Observation[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2013.]

[24] 马柱国, 符淙斌. 中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析[J]. 气象学报, 2001, 59(6): 741−746. [Ma Zhuguo, Fu Congbin. The trend analysis of land surface humidity in arid areas of northern China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2001, 59(6): 741−746.]

[25] 马柱国, 符淙斌, 杨庆, 等. 关于我国北方干旱化及其转折性变化[J]. 大气科学, 2018, 42(4): 951−961. [Ma Zhuguo, Fu Congbin, Yang Qing, et al. Drying trend in northern China and its shift during 1951- 2016[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(4): 951−961.]

[26] Paredes P, Fontes J C, Azevedo E B, et al. Daily reference crop evapotranspiration in the humid environments of Azores islands using reduced data sets: Accuracy of FAO- PM temperature and Hargreaves-Samani methods[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2018, 134: 595−611.

[27] Kendall M G. Rank correlation methods[J]. Journal of the Institute of Actuaries, 1949, 75(1): 140−141.

[28] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245−259.

[29] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63 (324): 1379−1389.

[30] Theil H. A Rank-Invariant Method of Linear and Polynomial Regression Analysis[M]. Henri Theil's Contributions to Economics and Econometrics. Springer, Dordrecht, 1992: 345−381.

[31] McCuen R H. A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating evaporation[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1974, 10(3): 486−497.

[32] Gong Lebing, Xu Chongyu, Chen Deliang, et al. Sensitivity of the Penman- Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) Basin[J]. Journal of Hydrology, 2006, 329(3−4): 620−629.

[33] Dong Qing, Wang Weiguang, Shao Quanxi, et al. Historical changes, driving forces, and future projections of the response of reference evapotranspiration to climate change in Xinjiang, China[J]. International Journal of Climatology, 2020, 40(1): 235−254.

[34] Liu Xiaomang, Zhang Dan. Trend analysis of reference evapotranspiration in Northwest China: The roles of changing wind speed and surface air temperature[J]. Hydrological Processes, 2013, 27(26): 3941−3948.

Climate dry-wet conditions, changes, and their driving factors in Xinjiang

DONG Hanlin[1], WANG Wenting[2], XIE Yun[1,2],
Aydana YESINALI[1], JIANG Yuantian[2], XU Jiaqi[1]
(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Faculty of Arts and Sciences, Beijing Normal University, Zhuhai 519087, Guangdong, China)

Abstract: Based on daily observations from 56 meteorological stations from 1961 to 2019, this study analyzed dry-wet conditions, changes, and their underlying driving factors in Xinjiang. The main findings are as follows: (1) In the past 59 years, the Xinjiang climate has changed significantly from dry to wet, with the aridity index (AI) changing at a rate of $0.01 \cdot (10a)^{-1}$ ($P < 0.01$). The number of stations with a significant upward trend of AI accounted for 57.1%. (2) The annual precipitation in Xinjiang increased significantly at a rate of $8.6\ mm \cdot (10a)^{-1}$ from 1961 to 2019, consistent with the change in AI. Conversely, the annual reference evapotranspiration (ET_0) showed a significant decreasing trend at a rate of $-15.7\ mm \cdot (10a)^{-1}$. However, it is worth noting that ET_0 transitioned around 1990. ET_0 continued to decrease before 1990 and then switched to a fluctuating upward trend. (3) Wind speed and relative humidity primarily influenced ET_0 variation. Wind speed exhibited a consistent decreasing trend across the entire region, while approximately half of the stations observed a decline in relative humidity. The combined effect of these factors significantly decreased ET_0 at nearly 50% of the stations in Xinjiang. Moreover, trends in relative humidity from increasing to decreasing trends and wind speed from decreasing to increasing around 1990 contribute to the differences in ET_0 trends between the two periods. The conclusions achieved here provide valuable insights into understanding the dry-wet changes and their underlying driving factors in Xinjiang and have implications for the rational development and use of water resources in this region.

Keywords: climate dry-wet changes; aridity index; evapotranspiration; driving factors; Xinjiang